

## R718-R744용 캐스케이드 냉동시스템의 최대 성능 예측

노건상<sup>1</sup>, 손창효<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>동명대학교 냉동공조공학과, <sup>2</sup>부경대학교 기계공학부

### Prediction on Maximum Performance of Cascade Refrigeration System Using R717 and R744

Geun-Sang Roh<sup>1</sup> and Chang-Hyo Son<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Division of Refrigeration and Air-Conditioning, TongMyong University

<sup>2</sup>Division of Mechanical Engineering, PuKyoung National University

**요약** 본 논문은 시스템의 운전조건하에서 R717-R747용 이원냉동 사이클의 성능 분석에 대한 기초 설계자료를 제공하는 것이다. 본 논문에서 고려한 운전변수는 암모니아 고온사이클과 이산화탄소 저온사이클의 과냉각도, 과열도, 응축과 증발온도이다. 이원 냉동사이클의 성적계수는 과열도가 증가할수록 증가하는 반면, 과냉각도가 증가할수록 감소한다. 그리고, 이원 냉동사이클의 성적계수는 응축온도와 함께 증가하지만, 증발온도와는 반대로 감소한다. 따라서, 과열도, 과냉도, 응축과 증발온도는 본 시스템의 성적계수에 영향을 미치는 것을 알 수 있었고, 최대 성능계수와 최적의 증발온도에 대한 수학 방정식을 개발하기 위해 이러한 변수들을 포함시켜 다중 회귀분석을 통해 제안하였다.

**Abstract** In this paper, cycle performance analysis of cascade refrigeration system using NH<sub>3</sub>-CO<sub>2</sub>(R717-R744) is presented to offer the basic design data for the operating parameters of the system. The operating parameters considered in this study include subcooling and superheating degree and condensing and evaporating temperature in the ammonia(R717) high temperature cycle and the carbon dioxide low temperature cycle. The COP of cascade refrigeration system increases with the increasing superheating degree, but decreases with the increasing subcooling degree. The COP of cascade refrigeration system increases with the increasing condensing temperature, but decreases with the increasing evaporating temperature. Therefore, superheating and subcooling degree, evaporating and condensing temperature of cascade refrigeration system using NH<sub>3</sub>-CO<sub>2</sub> have an effect on the COP of this system. A multilinear regression analysis was employed in terms of subcooling, superheating, evaporating, condensing, and cascade heat exchanger temperature difference in order to develop mathematical expressions for maximum COP and an optimum evaporating temperature.

**Key Words** : R744, R717, Maximum performance, Cascade refrigeration system

### 1. 서론

냉동창고나 슈퍼마켓의 저온저장 식품인 어류나 육류를 보관하기 위한 온도는 일반적으로 -30~-50℃로, 이 저온까지 온도를 낮추고 유지하기 위해서는 저온용 냉동시스템이 필요하다.[1~2] 일반적으로 저온용 냉동장치에는 2단 또는 3단의 다단 압축 사이클이나 2개의 사이클을 이용한 이원 냉동사이클이 있다.[3] 그러나 단일 냉매를

사용하는 다단 왕복동식 증기 압축 냉동장치로 저온을 얻는데 한계가 있다. 즉, 상당히 낮은 증발온도를 얻으려면 압축비가 너무 커지고 압축효율과 성능계수 등이 저하된다. 그러므로 이런 경우 -30~-50℃의 저온을 얻기 위해서 R23, R170, R1150과 같은 비교적 고압냉매를 사용하는 저온사이클(Low temperature cycle)과 R22, R134a와 같은 저압냉매를 사용하는 고온사이클(High temperature cycle)이 캐스케이드 열교환기(Cascade heat exchanger)를

\*교신저자 : 손창효(sonch@pknu.ac.kr)

접수일 09년 06월 22일

수정일 (1차 09년 09월 11일, 2차 09년 10월 07일)

게재확정일 09년 10월 14일

통해 열교환하는 이원 냉동 사이클을 이용한다. 지금까지 이원냉동사이클의 고온부와 저온부에 사용되어 왔던 프레온계 냉매는 지구온난화와 오존층 파괴로 인해 사용이 제한되어 있기 때문에, 이에 대한 대체 냉매로 ethanol, R717(암모니아), R1270(프로필렌), R290(프로판), R744(이산화탄소)와 같은 자연냉매(Natural refrigerant)들이 거론되고 있다. 즉, 고온사이클내에는 ethanol, R717, R1270, R290 등이, 저온사이클내에는 R744 등이 고려되고 있다.[4]

자연냉매를 적용한 이원 캐스케이드 냉동시스템에 대한 종래의 연구들을 살펴보면, 우선 Lee 등[5]은 저온사이클내 R744의 응축온도를 최적화하기 위해 R744(저온부)와 R717(고온부)의 이원 냉동사이클의 성능을 이론적으로 분석하였다. 또한, Bhattacharyya 등[6]은 고온사이클내 R744의 증발온도를 최적화하기 위해 R744(고온부)와 R290(저온부)를 적용한 이원 냉동사이클의 성능을 연구하였다. 그리고, Bansal-Jain[7]은 저온부에 R744 냉매를, 고온부에 ethanol, R717, R1270, R290, R404A 등의 냉매를 적용한 이원 냉동사이클에 대한 성능을 열역학적으로 분석하였다. 이러한 종래연구로부터 최근들어 이원 냉동장치의 저온부와 고온부에 R-744와 R717 냉매를 적용하는 사례가 증가되는 추세이다. 하지만, 지금까지 R717과 R744를 적용한 캐스케이드 냉동사이클에 대한 성능 분석에 대한 자료가 부족할 뿐만 아니라 정확한 이론이 확립되어 있지 않은 실정이다.

따라서, 본 연구에서는 고온부에는 R717 냉매를, 저온부에는 R744 냉매를 적용한 캐스케이드 냉동사이클의 성능에 미치는 인자들을 이론적으로 파악 및 분석하고, 이를 통해 자연냉매를 적용한 이원 냉동시스템의 최적 설계를 위한 기초자료를 제공하고자 한다.

## 2. 성능 분석

본 논문에서 사용되는 냉매의 열역학적 물성치와 성능 분석은 EES(Engineering Equation Solver)[8] 소프트웨어를 이용하여 계산하였다. 고온사이클에는 R717 냉매를, 저온사이클에는 R744 냉매를 적용한 이원 냉동시스템의 성능 분석을 위해 다음과 같이 가정하였다.

- 저온과 고온사이클의 압축기내 냉매는 단열압축과정이고, 압축효율과 기계효율은 각각 0.8과 1이다.
- 저온과 고온사이클내 열교환기(증발기, 응축기, 캐스케이드 열교환기)내의 냉매 압력강하와 열손실은 무시한다.
- 저온과 고온사이클내 배관의 압력강하와 열손실은 무시한다.
- 저온과 고온사이클의 팽창밸브내 냉매는 단열팽창인 등엔탈피과정이다.
- 운동에너지와 위치에너지의 변화는 없는 것으로 가정한다.

그림 1은 본 연구에서 적용하는 이원 캐스케이드 냉동시스템의 상세도를 나타낸 것이고, 이의 분석에 필요한 식들은 표 1에 정리하였다. 캐스케이드 열교환기내 R717과 R744의 전열량( $Q_{cas}$ )은 위의 가정에서 주위로의 열손실이 없다고 하였으므로 아래의 식(1)과 (2)로 나타낼 수 있다.

$$Q_{cas} = Q_{cas,c} = Q_{cas,e} \dots\dots\dots(1)$$

$$Q_{cas} = m_L(h_2 - h_3) = m_H(h_5 - h_8) \dots\dots\dots(2)$$

[표 1] R717-R744용 이원 냉동 사이클의 각 구성품에 대한 열평형식.

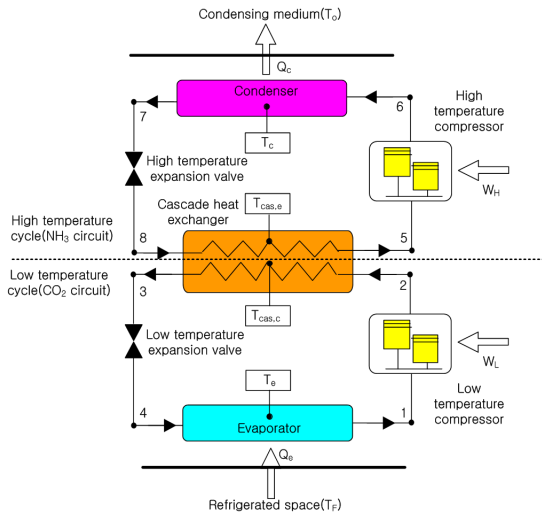
| Cycle   | Component            | Energy                                       | Mass                               |
|---|----------------------|--|------------------------------------|
| High temperature refrigeration cycle (R717 circuit) | Evaporator(8→5)      | $Q_{cas,e} = m_H(h_5 - h_8)$                 | $m_H = m_5 = m_6$<br>$= m_7 = m_8$ |
|   | Compressor(5→6)      | $W_H = m_H(h_6 - h_5) / \eta_{ch} \eta_{ch}$ |                                    |
|   | Condenser(6→7)       | $Q_c = m_H(h_6 - h_7)$                       |                                    |
|   | Expansion valve(7→8) | $h_7 = h_8$                                  |                                    |
| Low temperature refrigeration cycle (R744 circuit)  | Evaporator(4→1)      | $Q_e = m_L(h_1 - h_4)$                       | $m_L = m_1 = m_2$<br>$= m_3 = m_4$ |
|   | Compressor(1→2)      | $W_L = m_L(h_2 - h_1) / \eta_{cl} \eta_{cl}$ |                                    |
|   | Condenser(2→3)       | $Q_{cas,c} = m_L(h_2 - h_3)$                 |                                    |
|   | Expansion valve(3→4) | $h_3 = h_4$                                  |                                    |

【표 2】 EES를 이용한 R717-R744용 이원 냉동 사이클의 열역학적 상태점의 계산.

| Evaporator outlet                                  | Compressor outlet  | Condenser outlet                     | Expansion valve outlet |
|--|--|--------------------------------------|------------------------|
| High temperature refrigeration cycle(R717 circuit) |  |                                      |                        |
| $P_5 = f(R717, T = T_{cas,e}, x = 1)$              | $P_6 = f(R717, T = T_c, x = 1)$  | $P_7 = P_6$                          | $P_8 = P_5$            |
| $T_5 = T_{cas,e} + \Delta T_{suh,H}$               | $T_6 = f(R717, P = P_6, h = h_6)$  | $T_7 = T_c - \Delta T_{suc,H}$       | $T_8 = T_{cas,e}$      |
| $h_5 = f(R717, T = T_5, P = P_5)$                  | $h_6^* = f(R717, P = P_6, s = s_5)$<br>$h_6 = (h_6^* - h_5) / \eta_{cH} \eta_{mH} + h_5$ | $h_7 = f(R717, P = P_7, T = T_7)$    | $h_8 = h_7$            |
| $s_5 = f(R717, T = T_5, P = P_5)$                  |  |                                      |                        |
| Low temperature refrigeration cycle(R744 circuit)  |  |                                      |                        |
| $P_1 = f(R744, T = T_e, x = 1)$                    | $P_2 = f(R744, T = T_{cas,c}, x = 1)$  | $P_3 = P_2$                          | $P_4 = P_1$            |
| $T_1 = T_e + \Delta T_{suh,L}$                     | $T_2 = f(R744, P = P_2, h = h_2)$  | $T_3 = T_{cas,c} - \Delta T_{suc,L}$ | $T_4 = T_e$            |
| $h_1 = f(R744, T = T_1, P = P_1)$                  | $h_2^* = f(R744, P = P_2, s = s_1)$<br>$h_2 = (h_2^* - h_1) / \eta_{cL} \eta_{mL} + h_1$ | $h_3 = f(R744, P = P_3, T = T_3)$    | $h_4 = h_3$            |
| $s_1 = f(R744, T = T_1, P = P_1)$                  |  |                                      |                        |

이원 냉동시스템의 전체 성적계수(COP)는 아래의 식 (3)으로 계산한다.

$$COP = \frac{(h_5 - h_8)(h_1 - h_4)}{(h_6 - h_5)(h_2 - h_3) + (h_5 - h_6)(h_2 - h_1)} \dots\dots(3)$$



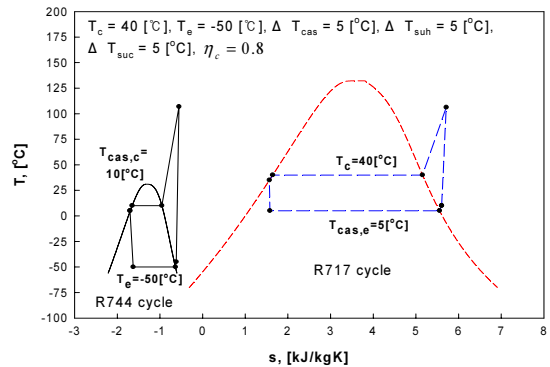
【그림 1】 R717-R744용 이원 냉동 사이클의 상세도.

R717과 R744의 이원 냉동사이클의 각 상태점에서의 열물성치(엔탈피, 엔트로피, 압력, 온도 등) 계산은 표 2에 나타내었고, 표 3에는 본 연구에서 사용되는 이원 냉동시스템의 성능 분석 범위를 나타내었다. 표 3에서 성능 분석범위는 R717과 R744용 이원 냉동사이클의 일반적인 운전조건이다. R717과 R744용 이원 냉동사이클의 개략도와 상태점을 나타낸 그림 1과 운전조건을 나타낸 표 3

을 이용하여 T-s선도를 그림 2에 나타내 보았다. 표 1의 분석조건으로부터 표 2~3의 수식과 열물성치값을 계산하고 이렇게 나온 결과값을 이용하여 R717과 R744용 이원 냉동사이클의 성능에 영향을 미치는 과열도, 과냉도, 증발온도, 응축온도 등의 인자들에 대해서 살펴보고자 한다.

【표 3】 R744용 냉동장치의 성능분석 범위

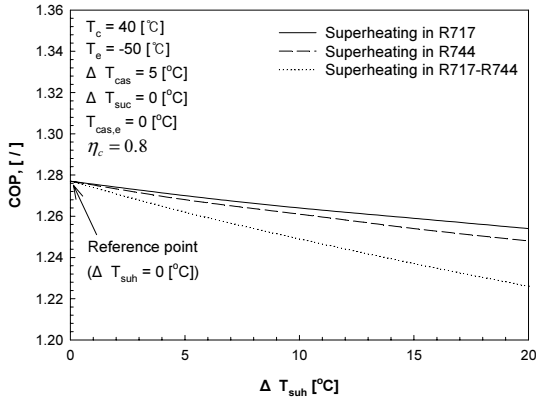
| Refrigerant   | R717, R744 |
|---|------------|
| $T_c$ , [°C]  | 10 ~ 50    |
| $T_e$ , [°C]  | -30 ~ -50  |
| $\Delta T_{suc} = \Delta T_{suc,L} = \Delta T_{suc,H}$ , [°C] | 0 ~ 20     |
| $\Delta T_{suh} = \Delta T_{suh,L} = \Delta T_{suh,H}$ , [°C] | 0 ~ 20     |
| $\eta_c = \eta_{cL} = \eta_{cH}$ , [I]                        | 0.8        |
| $\eta_m = \eta_{mL} = \eta_{mH}$ , [I]                        | 1          |
| $\Delta T_{cas} = T_{cas,c} - T_{cas,e}$ , [°C]               | 5          |
| $T_{cas,e}$ , [°C]  | 0 ~ -30    |
| $T_{cas,c}$ , [°C]  | 5 ~ -25    |



【그림 2】 R717-R744용 이원 냉동 사이클의 T-s선도.

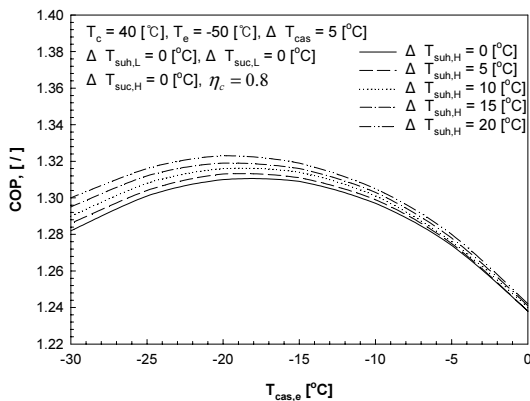
### 3. 본론

#### 3.1 과열도의 영향



[그림 3] 고온과 저온 사이클에 대한 과열도의 영향.

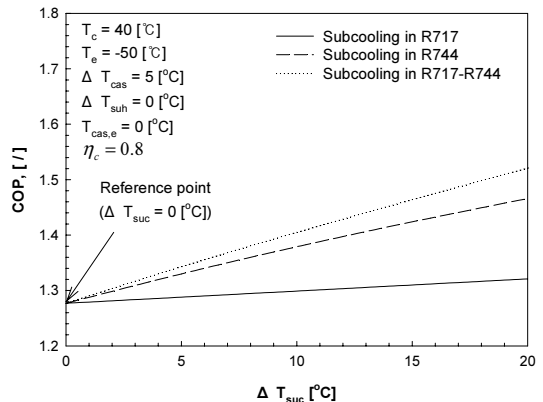
그림 3은 R717-R744용 이원 냉동시스템에 대한 과열도 영향을 파악하기 위해 고온과 저온사이클 각각에 대해 과열도를 부가해 본 것이다. 즉, 실선은 R717용 고온사이클에만, 파선은 R744용 저온사이클에만, 그리고 점선은 고온과 저온사이클 모두에 대해서 과열도를 0~20℃까지 주었다. 그림 3에서 알 수 있듯이, R717용 고온사이클에만 과열도를 부가했을 때 이원 냉동사이클의 성적계수(COP)가 가장 높게 나타났으며, 이러한 경향은 과열도가 증가할수록 더욱더 확실하게 나타남을 알 수 있다. 따라서, R717용 고온사이클에만 과열도를 부가하여 R717-R744용 이원 냉동시스템의 성적계수를 파악해 보았고, 그 결과는 그림 4에 나타내었다.



[그림 4] 고온 사이클의 과냉도 변화에 따른 R717-R744용 이원 냉동 사이클의 성적계수.

그림 4는 응축온도( $T_c=40$ ℃), 증발온도( $T_e=-50$ ℃), 캐스케이드 온도차( $\Delta T_{cas}=T_{cas,c}-T_{cas,e}=5$ ℃), 저온과 고온사이클 과냉각도( $\Delta T_{suc,L}=\Delta T_{suc,H}=0$ ℃), 저온사이클 과열도( $\Delta T_{suh,L}=0$ ℃), 저온과 고온압축기의 압축효율( $\eta_c=\eta_{cl}=\eta_{ch}=0.8$ )를 동일하게 유지한 상태에서 캐스케이드 증발온도(R717의 증발온도,  $T_{cas,e}$ )와 고온사이클의 과열도(압축기 입구온도-증발기 출구온도,  $\Delta T_{suc,H}$ ) 변화에 따라 R717과 R744용 이원 냉동사이클의 성적계수(COP)를 나타낸 것이다. 그림 4에서 고온사이클의 과열도가 증가할수록 성적계수는 증가하는 것을 알 수 있다. 이는 과열도가 증가할수록 저온사이클의 증발열량( $Q_e$ )이 증가하기 때문이다. 또한, 그림 4에서 알 수 있듯이, 일정한 과열도에서 고온사이클의 증발온도( $T_{cas,e}$ )가 감소할수록 성적계수는 증가하다가 최대값을 가진 후 다시 감소하는 경향을 보인다.  $\Delta T_{suh}=0, 10, 20$ ℃인 경우,  $T_{cas,e}$ 가 -21.5℃, -20.7℃, -20℃에서 최대 성적계수( $COP_{MAX}$ )는 각각 1.382, 1.361, 1.343이다. 이러한 결과에는 증발열량( $Q_e$ ), 고온과 저온사이클 압축일량( $W_H, W_L$ ) 등이 관여하기 때문이다. 우선, 증발열량은  $T_{cas,e}$ 가 감소함에 따라 일정한 비율로 계속해서 증가한다. 따라서, 고온과 저온사이클의 압축일량에 의해 성적계수가 좌우된다. 즉,  $T_{cas,e}$ 가 감소할수록  $W_H$ 는 증가하는 반면  $W_L$ 은 감소한다.  $T_{cas,e}$ 가 0~21℃까지의 범위에서 성적계수가 증가하는 이유는  $W_L$ 의 감소비율에 비해  $W_H$ 의 증가비율이 작기 때문이고,  $T_{cas,e}$ 가 -21~-30℃까지의 범위에서 성적계수가 감소하는 이유는  $W_L$ 의 감소비율에 비해  $W_H$ 의 증가비율이 커기 때문이다.

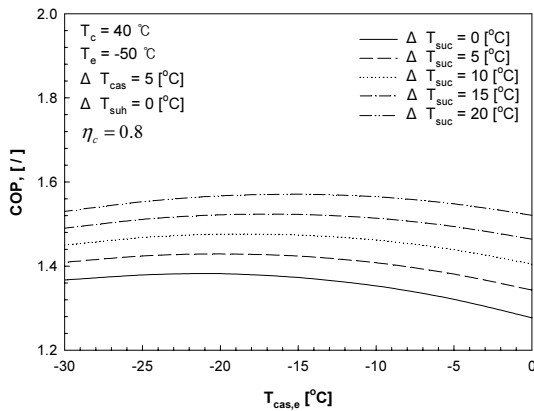
#### 3.2 과냉각도의 영향



[그림 5] 고온과 저온 사이클 각각에 대한 과냉각도의 영향.

그림 5는 R717-R744용 이원 냉동시스템에 대한 과냉

각도의 영향을 파악하기 위해 고온과 저온사이클 각각에 대해 과냉각도를 부가한 그래프이다. 즉, 실선은 R717용 고온사이클에만, 파선은 R744용 저온사이클에만, 그리고 점선은 고온과 저온사이클 모두에 대해서 0~20℃까지 과냉도를 주었다. 그림 5에서 알 수 있듯이, 고온과 저온사이클 모두에 과냉도를 부가했을 때 이원 냉동사이클의 COP가 가장 높게 나타났으며, 이러한 경향은 과냉도가 증가할수록 더욱더 확실하게 나타남을 알 수 있다. 따라서, 고온과 저온사이클 모두에 과냉도를 부가하여 R717-R744용 이원 냉동시스템의 성적계수를 파악해 보았고, 그 결과는 그림 6에 나타내었다.

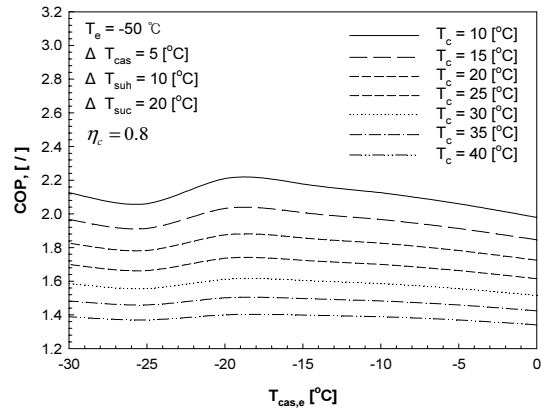


[그림 6] 저온과 고온 사이클의 과냉각도 변화에 따른 R717-R744용 이원 냉동 사이클의 성적계수.

그림 6은 응축온도( $T_c=40^\circ\text{C}$ ), 증발온도( $T_e=-50^\circ\text{C}$ ), 캐스케이드 온도차, 저온고온사이클의 과열도(압축기 입구 온도-증발기 출구 온도,  $\Delta T_{suh}=\Delta T_{suh,L}=\Delta T_{suh,H}=0^\circ\text{C}$ ), 저온과 고온압축기의 압축효율( $\eta_c=\eta_{cL}=\eta_{cH}=0.8$ )로 동일하게 유지한 상태에서 캐스케이드 증발온도(R717의 증발 온도,  $T_{cas,e}$ )와 저온고온사이클의 과냉각도(응축기 출구 온도-팽창밸브 입구 온도,  $\Delta T_{suc}=\Delta T_{suc,L}=\Delta T_{suc,H}$ ) 변화에 따라 R717과 R744를 사용하는 이원 냉동사이클의 COP를 나타낸 것이다. 그림 6에서  $\Delta T_{suc}$ 가 증가할수록 COP가 증가함을 알 수 있다. 이는  $\Delta T_{suc}$ 가 증가할수록  $W_H$ 와  $W_L$ 은 거의 일정한 반면,  $Q_c$ 가 증가하기 때문이다. 또한, 그림 6에서  $\Delta T_{suc}$ 가 일정한 경우,  $T_{cas,e}$ 가 감소할수록 COP가 증가하다가 최대값을 가진 후 다시 감소하는 경향을 보인다.  $\Delta T_{suc}=0, 10, 20^\circ\text{C}$ 인 경우,  $T_{cas,e}$ 가  $-21.5^\circ\text{C}$ ,  $-18.4^\circ\text{C}$ ,  $-15.65^\circ\text{C}$ 에서 최대 성적계수( $COP_{MAX}$ )는 각각 1.382, 1.477, 1.571이다. 이는 위의 과열도에서 언급한 이유와 동일하다.

### 3.3 응축온도의 영향

그림 7은 증발온도, 캐스케이드 온도차, 저온고온사이클의 과냉각도, 저온고온사이클의 과열도를 동일하게 유지한 상태에서 캐스케이드 증발온도와 고온사이클의 응축온도변화에 따라 R717과 R744를 사용하는 이원 냉동사이클의 성적계수(COP)를 나타낸 것이다. 그림 7에서  $T_c$ 가 감소할수록 이원 냉동사이클의 COP가 증가함을 알 수 있다. 이는  $T_c$ 가 감소할수록  $Q_c$ 와  $W_L$ 이 거의 일정한 반면  $W_H$ 가 감소하기 때문이다. 또한, 그림 7에서  $T_c$ 가 일정한 경우,  $T_{cas,e}$ 가 감소할수록 COP가 증가하다가 최대값을 가진 후 다시 감소하고 증가하는 경향을 보인다. 그리고  $T_c=10, 20, 30, 40^\circ\text{C}$ 인 경우,  $T_{cas,e}$ 가  $-24.7, -21.5, -18.45, -15.55^\circ\text{C}$ 에서 최대 성적계수( $COP_{MAX}$ )는 각각 2.412, 2.038, 1.752, 1.525로 감소한다. 이와 같이  $T_c$ 가 일정한 경우,  $T_{cas,e}$ 의 감소에 따른 COP의 변화는 위에서 언급한 것처럼,  $Q_c$ 는 거의 일정한 비율로 증가하지만,  $W_H$ 는 증가하고  $W_L$ 은 감소한다. 즉,  $T_{cas,e}$ 의 감소에 따른  $W_H$ 와  $W_L$ 의 증가와 감소 비율이 변화기 때문이다.

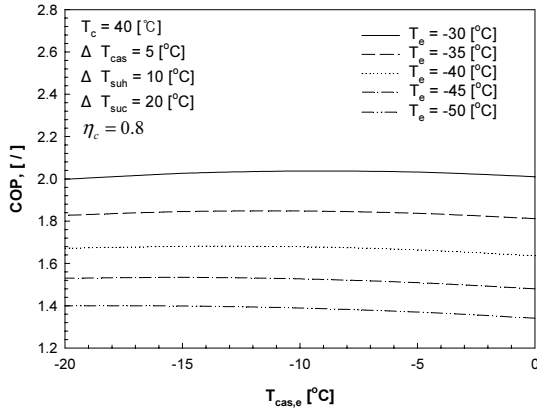


[그림 7] 고온과 저온 사이클의 응축온도 변화에 따른 R717-R744용 이원 냉동 사이클의 성능계수.

### 3.4 증발온도의 영향

그림 8은 응축온도, 증발온도, 캐스케이드 온도차, 저온고온사이클의 과냉각도, 저온고온사이클의 과열도의 동일할 실험조건에서 캐스케이드 증발온도와 고온사이클의 증발온도 변화에 따라 R717과 R744용 이원 냉동사이클의 COP를 나타낸 것이다. 그림 8에서  $T_c$ 가 증가할수록 이원 냉동사이클의 COP가 증가함을 알 수 있다. 이는  $T_c$ 가 증가할수록  $Q_c$ 와  $W_H$ 이 거의 일정한 반면  $W_L$ 가 감소하기 때문이다. 또한, 그림 8에서  $T_c$ 가 일정한 경우,  $T_{cas,e}$ 가 감소할수록 COP는 거의 일정한 것으로 보이나

실제로는 COP가 증가하다가 최대값을 가진 후 다시 감소하고 증가하는 경향을 보인다. 그리고  $T_e = -30, -40, -50^\circ\text{C}$ 인 경우,  $T_{cas,e}$ 가  $-6.1, -10.8, -15.55^\circ\text{C}$ 에서  $COP_{MAX}$ 는 각각 2.216, 1.83, 1.525로 감소한다. 이는 위에서 언급한 과열도와 과냉도의 영향과 동일한 이유 때문이다.



[그림 8] 고온과 저온 사이클의 증발온도 변화에 따른 R717-R744용 냉동 사이클의 성능계수.

### 3.5 수학적 방정식 개발

지금까지 R717과 R744용 이원 냉동사이클의 성능에 영향을 미치는 과열도, 과냉각도, 압축효율, 증발온도, 응축온도 등의 인자들에 대해서 살펴본 보았고, 그 결과 이들 각각의 인자들에 대해 이원 냉동사이클의 성적계수를 최대로 하는 캐스케이드 증발온도가 존재함을 알 수 있었다. 따라서 본 절에서는 다중 회귀분석을 통해 R717과 R744용 이원 냉동시스템의 최대 성적계수( $COP_{MAX}$ )와 최적의 증발온도( $T_{cas,e,opt}$ )에 대한 수학적 방정식을 개발하였다.  $COP_{MAX}$ 와  $T_{cas,e,opt}$ 는 앞에서 살펴본 결과, 과열도 ( $\Delta T_{Suh}$ ), 과냉도( $\Delta T_{suc}$ ), 증발온도( $T_e$ ), 응축온도( $T_c$ ), 캐스케이드 온도차( $\Delta T_{cas}$ )에 영향을 받음을 알 수 있었기 때

문에 이에 대한 함수로서 나타낼 수 있고, 이들 함수에 대해 다중 회귀분석을 실시하였다.

$$COP_{MAX}, T_{cas,e,opt} = f(\Delta T_{suc}, \Delta T_{suh}, T_e, T_c, \Delta T_{cas}) \quad (4)$$

$COP_{MAX}$ 와  $T_{cas,e,opt}$ 의 다중 회귀분석 결과에 대한 수식은 아래의 식과 같고,  $a_0 \sim a_5$ 에 대한 값은 표 4에 정리하였다.

$$T_{cas,e,opt} = a_0 + a_1 \Delta T_{suh} + a_2 \Delta T_{suc} + a_3 T_e + a_4 T_c + a_5 \Delta T_{cas} \quad (5)$$

$$COP_{MAX} = a_0 + a_1 \Delta T_{suh} + a_2 \Delta T_{suc} + a_3 T_e + a_4 T_c + a_5 \Delta T_{cas} \quad (6)$$

## 4. 결론

$-50^\circ\text{C}$  정도의 저온을 얻는데 사용되는 R717과 R744용 이원 냉동사이클의 성능에 영향을 미치는 과열도, 과냉각도, 압축효율, 증발온도, 응축온도 등의 인자들에 대해서 표 3의 운전조건에서 살펴본 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. R717용 고온사이클에만  $0 \sim 20^\circ\text{C}$ 까지 과열도를 주었을 때, 이원 냉동사이클의 COP가 가장 높게 나타났다. R717용 고온사이클의 과열도가 증가할수록 이원 냉동사이클의 COP는 증가하는 것을 알 수 있다.
2. R717과 R744용 이원 냉동시스템의 고온과 저온사이클 모두에 대해  $0 \sim 20^\circ\text{C}$ 까지 과냉각도를 주었을 때, 이원 냉동사이클의 COP가 가장 높게 나타났다. 고온과 저온사이클의 과냉각도가 증가할수록 이원 냉동사이클의 COP가 증가함을 알 수 있었다.
3. R717과 R744용 이원 냉동시스템의 응축온도가 증가할수록 이원 냉동사이클의 COP는 증가하지만, 증발온도는 감소할수록 COP가 감소함을 확인할 수 있었다.

[표 4] 식(5)와 (6)의 통계학적 정보.

|  | Linear regression coefficients for $COP_{MAX}$ |                | Linear regression coefficients for $T_{cas,e,opt}$ |                |
|--|--|----------------|--|----------------|
|  | Value  | Standard error | Value  | Standard error |
| $a_0$  | -13.8181800                                    | 0.0642637      | -370.1818000                                       | 0.1556515      |
| $a_1$  | 0.0078058                                      | 0.0019201      | 0.2923097  | 0.0046506      |
| $a_2$  | -0.0046607                                     | 0.0026871      | 0.0129662  | 0.0065083      |
| $a_3$  | -0.0283607                                     | 0.0018759      | 0.3049930  | 0.0045435      |
| $a_4$  | 0.0346055                                      | 0.0030101      | 0.4678991  | 0.0072908      |
| $a_5$  | 3.6153780                                      | 0.0642637      | 71.9885400   | 0.1556515      |
| No. point : 25, rms= 0.0642640, $R^2= 96.14\%$ |  |                | No. point=25, rms=0.1556500, $R^2=99.89\%$         |                |

4. 과열도, 과냉각도, 증발온도, 응축온도 등의 인자들이 R717과 R744용 이원 냉동사이클의 COP에 영향을 미치는 것을 확인할 수 있었고, 이들 각각의 인자들은 이원 냉동사이클의 성능을 최대로 하는 캐스케이드 증발온도가 존재함을 알 수 있었다. 따라서 다중 회귀분석을 통해 최대 성적계수와 최적의 캐스케이드 증발온도에 대한 수학적 방정식을 제안하였다.

### 참고문헌

- [1] S. Sawalha, Using CO<sub>2</sub> in supermarket refrigeration. ASHRAE J. Vol. 47, No. 8, 26-30, 2005.
- [2] I. Wilson and D. Maier, Carbon dioxide for use as a refrigerant. In: Refrigeration Science and Technology, Proceedings, IIR-IRHACE Conference, Innovative Equipment and Systems for Comfort and Food Preservation. The University of Auckland, pp. 305-311, 2006.
- [3] S. N. Park and M. S. Kim, Performance of autocascade refrigeration system using carbon dioxide and R134a, Korea J. of Air-Conditioning and Refrigeration Eng., Vol. 11, No. 6, pp. 880-890, 1999.
- [4] C. Chaichana, L. Aye and W.W.S. Charters, 2003. Natural working fluids for solar-boosted heat pumps. Int. J. Refrigeration 26, 637-643, 2003.
- [5] T. S. Lee, C. H. Liu and T. W. Chen, Thermodynamic analysis of optimal condensing temperature of cascade condenser in CO<sub>2</sub>/NH<sub>3</sub> cascade refrigeration systems. Int. J. Refrigeration 29, 1100-1108, 2006.
- [6] S. Bhattacharyya, S. Mukhopadhyay, A. Kumar, R. K. Khurana and J. Sarkar, Optimization of a CO<sub>2</sub>-C3H8 cascade system for refrigeration and heating. Int. J. Refrigeration 28, 1284-1292, 2005.
- [7] P. K. Bansal and S. Jain, Cascade systems: past, present, and future. ASHRAE Trans. 113 (1), 245-252 (DA-07-027), 2007.
- [8] EES: Engineering Equation Solver, 2006. fChart Software Inc.

### 노 건 상(Geun-Sang Roh)

[정회원]



- 1990년 2월 : 부산 수산대학교 냉동공학과 (공학사)
- 1992년 2월 : 부산 수산대학교 냉동공조공학과 (공학석사)
- 1997년 2월 : 부경대학교 냉동공조공학과 (공학박사)
- 1997년 3월 ~ 현재 : 동명대학교 냉동공조공학과 조교수

<관심분야>

냉동장치의 시스템 향상 및 고성능 열교환기 개발 등에 관심

### 손 창 효(Chang-Hyo Son)

[정회원]



- 1998년 2월 : 여수수산대학교 냉동공학과 (공학사)
- 2000년 2월 : 부경대학교 냉동공조공학과 (공학석사)
- 2004년 8월 : 부경대학교 냉동공조공학과 (공학박사)
- 2007년 3월 ~ 현재 : 부경대학교 기계공학부 누리계약교수

<관심분야>

냉동공조용 열교환기 설계 및 제작, 냉동 및 열펌프 시스템 설계